

САМОВОЗБУЖДЕНИЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ПИТАЮЩИХСЯ ОТ СТАТИЧЕСКОГО УТРОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Я. В. ПЕТРОВ, А. И. ЗАЙЦЕВ

(Представлено научным семинаром электромеханического факультета)

Источником тока 150 *пер/сек* для трехфазных асинхронных электродвигателей небольшой мощности, например, ручного электроинструмента, может быть статический электромагнитный утроитель частоты с продольной емкостной компенсацией на выходе. Однако при пуске двигателя последний часто самовозбуждается и, работая одновременно двигателем и генератором токов пониженной частоты, не достигает нормального числа оборотов. Результирующий момент на валу уменьшается (практически до нуля у ненагруженного двигателя) и колеблется около некоторого среднего значения вследствие качания ротора относительно соответствующей средней скорости (рис. 1)¹⁾.

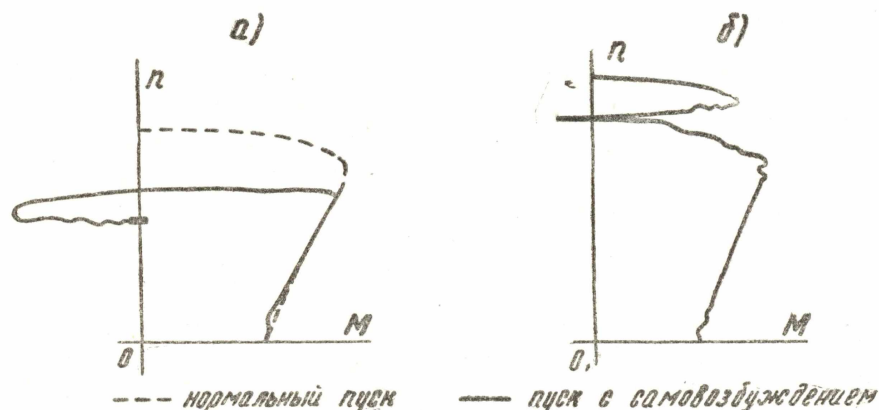


Рис. 1.

По элементам установки протекают токи основной и пониженной частот, что вызывает резкое искажение форм кривых напряжений и токов по типу биений, интенсивный нагрев и перенапряжения элементов.

¹⁾ Механические характеристики двигателя сняты по способу, разработанному кафедрой электрификации промышленных предприятий Томского политехнического института [6].

По данным наших опытов, скорость застревания двигателя, пускаемого на холостом ходу, составляет около 40—60% от синхронной (верхние значения относятся к меньшим емкостям конденсаторов), пики напряжения на двигателе превосходят амплитуду выходного напряжения холостого хода утроителя в 1,9—2,0 раза, пики тока примерно равны наибольшим амплитудам пускового тока, частота биеений 17—18 пер/сек.

Явления самовозбуждения асинхронных двигателей промышленной частоты, питающихся от трансформаторов или синхронных генераторов соизмеримой мощности через последовательно включенные конденсаторы, и двигателей в рассматриваемой системе принципиально однотипны и отличаются значительной сложностью [1, 2, 3, 4 и др.]. Нелинейность характеристик и неизбежная некоторая несимметрия и несинусоидальность выходных величин утроителя увеличивают трудности.

Цель настоящей работы—выбрать наиболее предпочтительные способы устранения самовозбуждения двигателей, присоединяемых к утроителям через последовательные конденсаторы. Параметры утроителя и асинхронного двигателя приняты линейными, напряжения и токи на выходе утроителя образуют трехфазные симметричные и синусоидальные системы, переходный электромагнитный процесс не учитывается, генераторный режим двигателя рассматривается независимо от двигательного режима. В основу исследования положен метод В. Т. Загорского [2].

На рис. 2 показана схема замещения установки для свободных токов (генераторный режим).

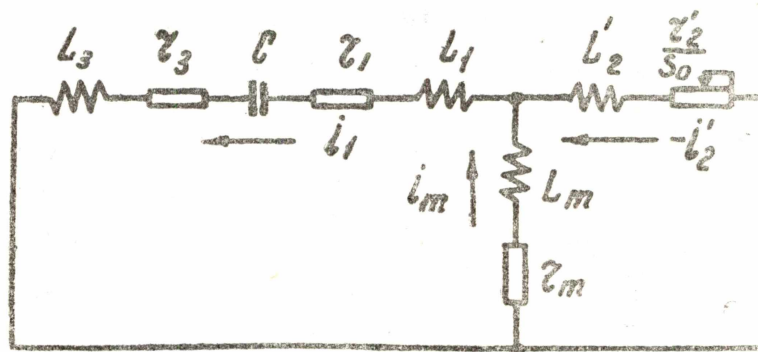


Рис. 2.

Уравнения электрического равновесия системы по Кирхгофу

$$-i_1 + i_m - i_2' = 0; \quad (1)$$

$$L_3 \frac{di_1}{dt} + r_3 i_1 + \frac{1}{C} \int i_1 dt + r_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + L_m \frac{di_m}{dt} + r_m i_m = 0; \quad (2)$$

$$L_2' \frac{di_2'}{dt} + \frac{r_2'}{s_0} i_2' + r_m \cdot i_m + L_m \frac{di_m}{dt} = 0, \quad (3)$$

где s_0 —скольжение ротора относительно поля свободных токов статора

$$s_0 = \frac{\omega_0 - \omega_2}{\omega_0}, \quad (4)$$

здесь ω_0 —угловая частота свободных токов статора,
 ω_2 —угловая скорость ротора.

Применяя алгебраизацию дифференциальных уравнений, перепишем (1), (2), (3):

$$-i_1 + i_m - i_2' = 0;$$

$$\left(L_3 p + r_3 + \frac{1}{Cp} + r_1 + L_1 p \right) i_1 + (L_m p + r_m) i_m = 0;$$

$$(L_m p + r_m) i_m + \left(L_2' p + \frac{r_2'}{s_0} \right) i_2' = 0.$$

Характеристическое уравнение системы получим, приравняв нулю определитель системы

$$\Delta = \begin{vmatrix} -1 & 1 & -1 \\ L_3 p + r_3 + \frac{1}{Cp} + r_1 + L_1 p & L_m p + r_m & 0 \\ 0 & L_m p + r_m & L_2' p + \frac{r_2'}{s_0} \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

После упрощений

$$\begin{aligned} p^3 [L_{13} (L_2' + L_m) + L_2' L_m] + p^2 \left[\frac{r_2'}{s_0} (L_{13} + L_m) + r_{13} (L_2' + L_m) + \right. \\ \left. + r_m (L_{13} + L_2') \right] + p \left[\frac{r_2'}{s_0} (r_{13} + r_m) + \frac{1}{C} (L_2' + L_m) + r_{13} r_m \right] + \\ + \frac{1}{C} \left(\frac{r_2'}{s_0} + r_m \right) = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

У опытного двигателя $r_m \ll x_m$, поэтому первым можно пренебречь и характеристическое уравнение упрощается

$$\begin{aligned} p^3 [L_{13} (L_2' + L_m) + L_2' L_m] + p^2 \left[\frac{r_2'}{s_0} (L_{13} + L_m) + r_{13} (L_2' + L_m) \right] + \\ + p \left[\frac{r_2'}{s_0} r_{13} + \frac{1}{C} (L_2' + L_m) \right] + \frac{r_2'}{s_0} \cdot \frac{1}{C} = 0. \end{aligned} \quad (6')$$

В уравнениях (6), (6')

$$L_{13} = L_1 + L_3, \quad r_{13} = r_1 + r_3.$$

Из (6') определяем скольжение s_0

$$s_0 = - \frac{p^2 r_2' (L_{13} + L_m) + p r_2' r_{13} + \frac{r_2'}{C}}{(L_2' + L_m) \left(p^3 L_3 + p^2 r_{13} + \frac{p}{C} \right)}, \quad (7)$$

где

$$L_3 = L_{13} + \frac{L_2' L_m}{L_2' + L_m}.$$

Области устойчивой (двигательный режим) и неустойчивой (генераторный режим) работы двигателя выделяем методом D -разбиения по одному параметру. В качестве вещественной части комплекс-

ного переменного β , в плоскости которого выделены указанные области, принимаем переменный параметр s_0 ; мнимой частью переменного β является вспомогательный параметр α , представляющий собой значение мнимой части (7) при замене $p = j\omega_0$.

В (7) подставляем $p = j\omega_0$, отделяем вещественную часть от мнимой, индуктивности и емкость заменяем соответствующими сопротивлениями при частоте 150 пер/сек. После преобразований получим следующее уравнение границы D -разбиения по параметру s_0 :

$$\beta = s_0 + j\alpha = - \frac{r'_2 r_{13}}{\left(1 + \frac{x'_2}{x_m}\right)^2 \left[r_{13}^2 + \left(\omega_0^* x_3 - \frac{x_c}{\omega_0^*}\right)^2\right]} + \\ + j \frac{(\omega_0^*)^2 \cdot r'_2 x_3 (x_{13} + x_m) - r'_2 \left[x_c (x_{13} + x_m + x_3) - r_{13}^2 - \left(\frac{x_c}{\omega_0^*}\right)^2\right]}{\omega_0^* (x'_2 + x_m) \left[r_{13}^2 + \left(\omega_0^* x_3 - \frac{x_c}{\omega_0^*}\right)^2\right]}, \quad (8)$$

где ω_0^* — угловая частота свободных колебаний в долях угловой частоты тока на выходе утроителя.

Подставляя численные значения параметров системы и принимая $\omega_0^* = 0 \div 1,0$, строим кривые границы D -разбиения по параметру s_0 для различной степени компенсации (рис. 3; 218 μF — емкость нормальной компенсации, 293 μF — емкость недокомпенсации). Заштрихованные области отвечают устойчивой работе двигателя; области, ограниченные кривыми, являются зонами неустойчивой работы двигателя — зонами самовозбуждения.

Каждая кривая пересекает ось вещественных величин в двух точках, которые характеризуют режим на границе устойчивой работы. Значения нижнего и верхнего граничных скольжений, s_{0H} и s_{0B} , могут быть получены непосредственным отсчетом по рис. 3 или определены аналитически согласно (8); в последнем случае имеем

$$s_{0H,B} = - \frac{r'_2 r_{13}}{\left(1 + \frac{x'_2}{x_m}\right)^2 \left[r_{13}^2 + \left(\omega_{0H,B}^* x_3 - \frac{x_c}{\omega_{0H,B}^*}\right)^2\right]}, \quad (9)$$

где граничные частоты самовозбуждения ω_{0H}^* и ω_{0B}^* находятся из выражения для вспомогательного параметра (7), если его приравнять нулю

$$\omega_{0H,B}^* = \sqrt{\frac{x_c(x_{13} + x_m + x_3) - r_{13}^2 \pm \sqrt{[x_c(x_{13} + x_m + x_3) - r_{13}^2]^2 - 4x_c^2 x_3 (x_{13} + x_m)}}{2x_3 (x_{13} + x_m)}} \quad (10)$$

(минус перед корнем ставится при определении ω_{0H}^*).

Можно также получить выражения для граничных угловых скоростей ротора, используя (4), (9) и (10). Расчетные и замеренные по осциллограммам скорости ротора, при которых наступает самовозбуждение, слишком разнятся (до 30 %), что объясняется принятыми допущениями.

Исключить самовозбуждение двигателя возможно либо путем слияния границ резонансной зоны (или, по крайней мере, достаточного их сближения, с тем чтобы двигатель при разгоне прошел по инерции эту зону), либо путем поднятия нижней границы за пределы рабочих скоростей двигателя. Из равенства (10) следует, что

принципиально любой параметр системы влияет на величину граничных частот самовозбуждения, но, если конструкции утроителя и двигателя уже выполнены, практически целесообразно и удобно менять лишь емкость конденсаторов и индуктивность нагрузки.

Полагая $\omega_{\text{ОН}}^* = \omega_{\text{ОВ}}^*$ (слияние границ резонансной зоны), получим на основании (10) условие отсутствия самовозбуждения

$$x_c = \frac{r_{13}^2 [x_{13} + x_m + x_3 + 2 \sqrt{x_3(x_{13} + x_m)}]}{(x_{13} + x_m - x_3)^2} \quad (11)$$

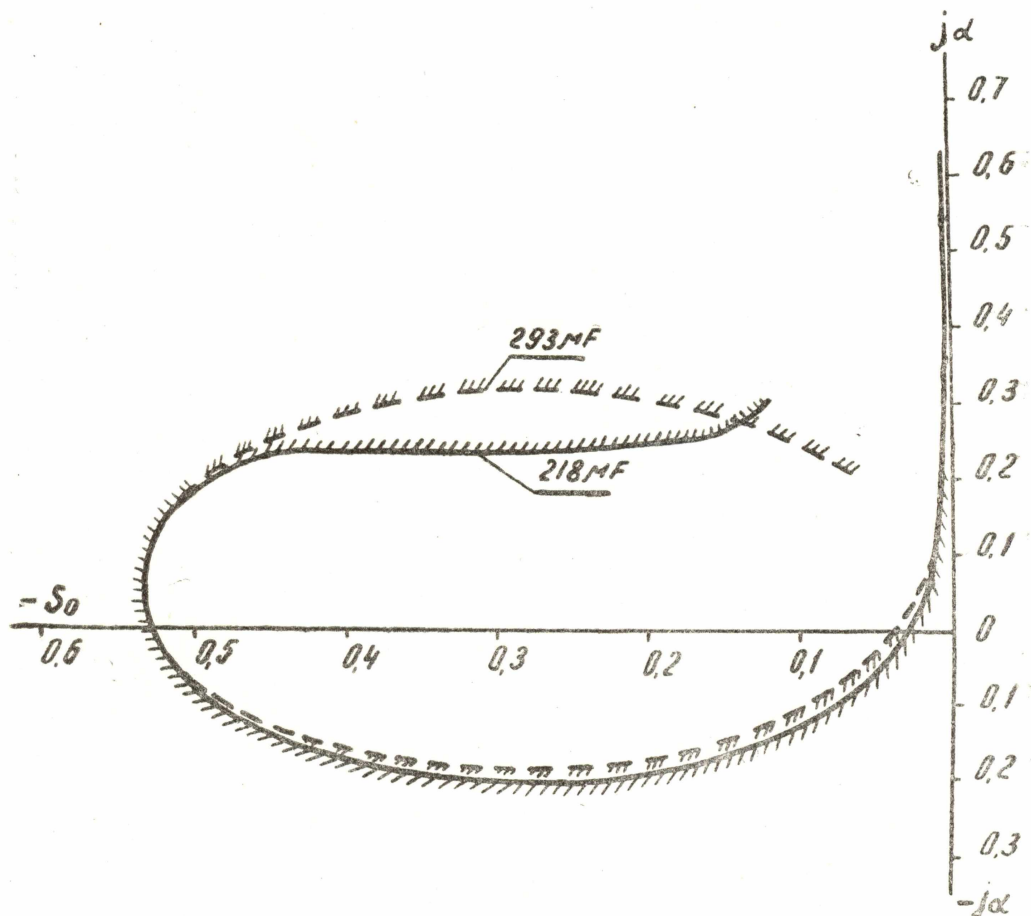


Рис. 3.

Анализ выражения (11) показывает, что наиболее сильное действие на процесс самовозбуждения оказывают емкость, активное сопротивление ветви статора и индуктивности двигателя. Устранение самовозбуждения увеличением активного сопротивления ветви статора или уменьшением сопротивления конденсаторов связано со значительными потерями энергии, ухудшением пусковых характеристик двигателя и весовых показателей утроителя (например, для нашей установки по расчету необходимо $r_{13} \approx 9,8 \text{ ом}$ при нормальной емкости $218 \mu F$ или $C = 2100 \mu F$, если активное сопротивление цепи искусственно не увеличивать).

Электродвигатели с бóльшим намагничивающим током (меньшим x_m) при прочих равных условиях менее склонны к самовозбуждению, так как имеют более узкую зону неустойчивой работы. Однако параметры двигателей 150 пер/сек задаются их рабочими и пусковыми характеристиками и для некоторого двигателя являются вполне

определенными. Поэтому в тех случаях, когда двигатель подвержен самовозбуждению, последнее может быть расстроено включением параллельно двигателю, непосредственно за конденсаторами, дросселей или другого двигателя (рис. 4), которые уменьшают эквивалентное индуктивное сопротивление цепи. На рис. 1, а представлена механическая характеристика двигателя при пуске на холостом ходу и параллельном включении трех однофазных дросселей; рис. 1, б показывает выход двигателя из резонансной зоны вслед за присоединением тех же дросселей.

Мощность дросселей выбирается из условия обеспечения нормального пуска наименее мощного двигателя из числа двигателей, питающихся от данного утроиителя.

На основании выражения (11) рассчитать необходимую мощность дросселей затруднительно. В опытах мощность дросселей составля-

ла 25—30% присоединенной мощности двигателя; при этом получены удовлетворительные пусковые и рабочие характеристики двигателя. Применение регулируемых подмагничиванием дросселей обещает улучшить условия пуска двигателя и одновременно повысить энергетические показатели установки. По окончании пуска дроссели могут

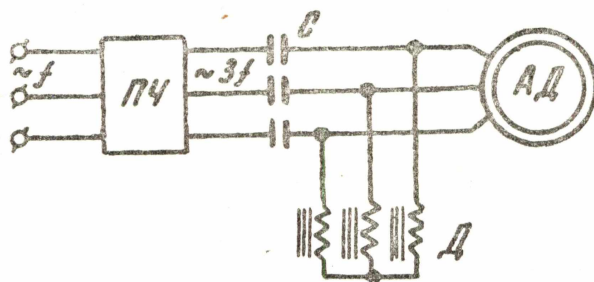


Рис. 4.

отключаться. Трехфазные дроссели менее желательны, так как создают несимметричную нагрузку и искажают форму кривых напряжения и тока утроиителя.

Основной недостаток дросселей — снижение коэффициента мощности установки — может быть устранен небольшим увеличением мощности конденсаторной батареи. Предпочтительнее вместо дросселей предварительно включать несамовозбуждающийся двигатель в тех случаях, когда это приемлемо.

Выше отмечен другой способ устранения генераторного режима двигателя — поднятием нижней границы резонансной зоны за пределы рабочих скоростей двигателя, практически до синхронной скорости. Это достигается, при прочих равных условиях, уменьшением емкости конденсаторов продольной компенсации. В этом случае резонансная зона расширяется, но в целом смещается в сторону больших скоростей двигателя. Значение емкостного сопротивления, при котором не будет возникать самовозбуждение, получим, приравняв нижнюю граничную частоту свободных колебаний угловой частоте на выходе утроиителя, то есть полагая в (10) $\phi_{0H}^* = 1$.

$$x_c = \frac{1}{2} \left(x_{13} + x_m + x_3 + \sqrt{\left(\frac{x_m}{\frac{x_2'}{x_m} + 1} \right)^2 - 4r_{13}^2} \right). \quad (12)$$

Пренебрегая относительно небольшими величинами $\frac{x_2'}{x_m}$ и $4r_{13}^2$, окончательно получим

$$x_c \approx x_{13} + x_m + \frac{1}{2} \frac{x_2' x_m}{x_2' + x_m} \approx x_3 + x_1 + x_m + \frac{1}{2} x_2'. \quad (13)$$

Таким образом, конденсаторы должны компенсировать практически индуктивность цепи при холостом ходе двигателя, чтобы самовозбуждение было невозможно. Но такая компенсация непригодна для режимов пуска и работы двигателя под нагрузкой, так как в этих случаях требуется значительно меньшее сопротивление конденсаторов

$$x_c = x_3 + \frac{U_0}{\sqrt{3}I_g} (U_g^* \sin \varphi_g - \sqrt{1 - (U_g^* \cos \varphi_g)^2}) \quad (14)$$

(пренебрегаем сопротивлениями питающей линии утритель—двигатель), где

U_0 — напряжение холостого хода утрителя;

$U_g^* = \frac{U_g}{U_0}$ — относительная величина напряжения двигателя;

$I_g, \cos \varphi_g$ — ток и коэффициент мощности двигателя.

Сочетать условия (13) и (14) можно лишь путем изменения емкости в процессе пуска [2]: в начальный период пуска величина емкости соответствует условию (14); при уменьшении пускового тока емкостное сопротивление необходимо увеличить согласно (13); по окончании пуска целесообразно уменьшить сопротивление емкости до значения (14). Для выполнения указанной программы изменения емкости требуется довольно сложная схема управления, целесообразность которой сомнительна. В упрощенном виде плавное уменьшение емкости в функции пускового тока с одновременным регулированием напряжения на двигателе достигается шунтированием конденсаторов дросселями насыщения, у которых намагничивающая сила задающей обмотки и обмотки отрицательной обратной связи по току двигателя направлены противоположно. При коротких замыканиях за конденсаторами дроссели насыщаются и в сильной степени шунтируют конденсаторы, защищая их от перенапряжений (рис. 5).

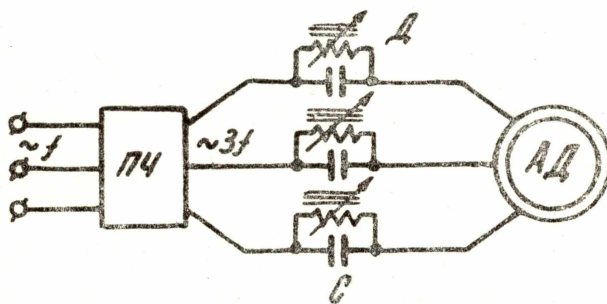


Рис. 5.

На опытной установке параллельно конденсаторам включались однофазные дроссели без подмагничивания. Гашение свободных колебаний и защита конденсаторов от перенапряжений во время коротких замыканий были удовлетворительными. Суммарная мощность дросселей не превышала 20—25 % присоединенной мощности двигателя. В начальный период пуска из-за насыщения дроссели чрезмерно шунтировали, конденсаторы и пусковые характеристики двигателя ухудшались. Поэтому необходимо применять дроссели с подмагничивающими обмотками.

Дроссели, присоединяемые параллельно конденсаторам, придают утрителю в основном те же недостатки, что и включенные параллельно двигателю.

Подмагничивание утрителя постоянным током тоже повышает нижнюю граничную частоту свободных колебаний, но незначительно, и самовозбуждение не расстраивается, так как влияние индуктивного сопротивления утрителя на процесс самовозбуждения невелико и сопротивление изменяется в относительно узких пределах.

В том же направлении, но более эффективно, действует повышение входного напряжения утробителя в процессе пуска двигателя, однако громоздкость устройства регулирования входного напряжения не позволяет применить этот способ.

В ряде случаев самовозбуждение не наблюдается при отсутствии дополнительных устройств, и в то же время обеспечиваются приемлемые пусковые и рабочие характеристики двигателя. Судя по опытам всегда нормального пуска электросверла ВЧС-10 от компенсированного утробителя и на основании выражений (13) и (14), предварительно можно заметить, что благоприятным является такое сочетание параметров установки, при котором индуктивное сопротивление холостого хода двигателя, утробителя и сопротивление конденсаторов имеют примерно одинаковый порядок.

Выводы

1. В системе статический утробитель—конденсаторы продольной компенсации—асинхронный двигатель при неблагоприятном соотношении параметров возникает самовозбуждение двигателя.

2. Наиболее желательно устранять самовозбуждение выбором таких параметров утробителя и конденсаторов, при которых даже наименее мощные двигатели в процессе пуска не подвергаются самовозбуждению и обеспечиваются в то же время приемлемые пусковые и рабочие характеристики двигателей. Приближенным ориентиром для назначения таких параметров могут служить равенства (11), (13) и (14).

3. Если нецелесообразно или невозможно ликвидировать самовозбуждение без применения специальных средств, следует применять параллельно включенные двигателю или конденсаторам дроссели.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. F. Wagner. Самовозбуждение индукционных двигателей с последовательными конденсаторами. Trans. AIEE V. 60, 1941.

2. В. Т. Загорский. Исследование пуска асинхронных короткозамкнутых двигателей от генераторов соизмеримой мощности, 1958.

3. В. Г. Бауман, О. В. Иванов, Б. И. Комаров. Самовозбуждение асинхронных двигателей с последовательными конденсаторами. Электричество, № 5, 1961.

4. А. Т. Голован, Чжан Чан-Шэн. Механическое качение асинхронной машины при ее работе с последовательно включенными конденсаторами. Электричество, № 10, 1962.

5. А. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники. Госэнергоиздат, 1961.

6. А. И. Зайцев, М. П. Табинский, А. С. Бобровский. Снятие механических характеристик асинхронного двигателя путем измерения скорости и ускорения двигателя в переходных режимах. Известия Томского политехнического института, том 117, 1963.

Поступила в редакцию
в июне 1962 г.